

Karakterisasi Isotop dan Geokimia Area Panas Bumi Danau Toba, Sumatera Utara

Isotopes and Geochemical Characterization of Toba Lake Geothermal Area, North Sumatera

Rasi Prasetio, Neneng Laksminingpuri dan Bungkus Pratikno

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya 49, Jakarta 12440
Email : rasi_p@batan.go.id

ABSTRAK

Danau Toba merupakan danau vulkanik terbesar di dunia dan memiliki aktifitas panasbumi. Terdapat dua wilayah di Danau Toba dengan manifestasi panasbumi berupa mata air panas, fumarol dan *steaming ground*, yaitu di daerah Simbolon dan Pusuk Buhit. Penelitian isotop dan geokimia terhadap fluida manifestasi lapangan panas bumi telah dilakukan untuk mengetahui karakter sistem panas bumi tersebut. Pengambilan sampel mata air panas dilakukan untuk analisis kandungan kimia, isotop ^{18}O dan ^2H (deuterium) serta isotop ^{222}Rn . Sampel gas diambil dari fumarol untuk analisis komposisi kimia gas. Interpretasi hasil analisis tersebut dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik sistem panas bumi seperti asal-usul dan evolusi fluida, temperatur *reservoir* hingga model konseptual *reservoir* danau Toba. Hasil analisis data menunjukkan bahwa area panasbumi danau Toba memiliki estimasi potensi panasbumi dengan temperatur 265°C di Pusuk Buhit dan 235°C di Simbolon. Berdasarkan data isotop stabil (^{18}O dan ^2H) dan gas, fluida panas bumi Toba merupakan fluida meteorik dengan sedikit kontribusi sumber magmatik. Namun demikian, komposisi isotop ^{18}O fluida panas bumi di Pusuk Buhit mengalami pergeseran akibat interaksi air-batuan yang lebih intens dibanding fluida daerah Simbolon. Kandungan ^{222}Rn yang rendah dalam sampel air panas menunjukkan adanya pencampuran fluida *reservoir* dengan air permukaan yang tidak mengandung ^{222}Rn atau air tanah lokal dengan kandungan ^{222}Rn yang sangat rendah.

Kata kunci : isotop, geokimia, panas bumi, radon, danau Toba

ABSTRACT

Lake Toba is the largest volcanic lake in the world and associated with geothermal activity. There are two areas in Lake Toba with geothermal manifestations such as hot springs, fumaroles and steaming ground, namely in the Simbolon and Pusuk Buhit areas. Study of isotope and geochemical compositions of thermal fluid in these areas has been done to assess the properties of geothermal system. Water samples taken from hot springs were analyzed for its chemical, ^{18}O and ^2H (deuterium) and ^{222}Rn isotope contents. While fumarolic gases were analyzed for its chemical composition. Interpretation of the analysis results was done to determine the reservoir characteristics such as the origin and evolution of the fluids, temperature of reservoir and also the conceptual model of the reservoir. The result shows that Lake Toba geothermal area has geothermal potential with estimated temperatures of 265°C in Pusuk Buhit and 235°C in Simbolon. Based on stable isotopes (^{18}O and ^2H) and gas compositions, Toba geothermal fluid is meteoric origin with minor contribution magmatic source. However, ^{18}O isotope composition of geothermal fluid in Pusuk Buhit has shifted due to more intense water-rock interactions compared to those in Simbolon area. The low ^{222}Rn content in water samples indicates that there is mixing process between reservoir fluids with surface waters without ^{222}Rn content or with ground water with very low ^{222}Rn content.

Keywords : Isotopes, geochemistry, geothermal, radon, Toba lake

PENDAHULUAN

Propinsi Sumatera Utara merupakan salah satu propinsi yang memiliki potensi panasbumi

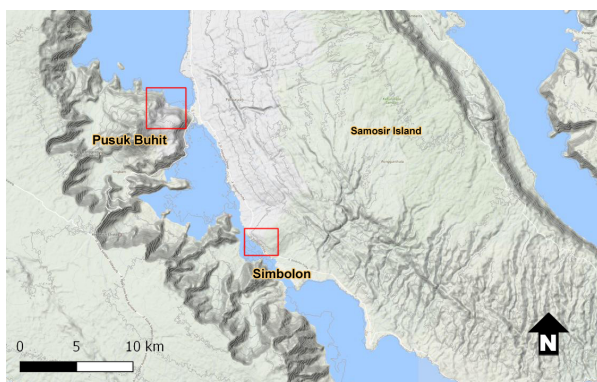
yang cukup besar, dengan komposisi potensi panasbumi entalpi tinggi sebesar 2253 MWe dan entalpi rendah sekitar 170 MWe [1]. Dari potensi tersebut, yang telah dimanfaatkan sebagai

pembangkit listrik sebesar 12 MW di Sibayak dan direncanakan akan dibangun juga pembangkit 330 MW di daerah Sarulla [2]. Selain di kedua tempat tersebut, salah satu tempat dengan potensi panasbumi adalah di daerah Danau Toba, yang merupakan danau vulkanik terbesar di dunia [3]. Daerah Danau Toba memiliki manifestasi panasbumi berupa mata air panas dan fumarol, yang terdapat di daerah Pusuk Buhit dan Simbolon.

Metode geokimia isotop telah banyak diaplikasikan pada berbagai kegiatan eksplorasi panasbumi di dunia untuk mengetahui beberapa karakteristik reservoir panasbumi seperti: temperatur bawah permukaan, jenis fluida panasbumi dan kondisi hidrogeologi [4], [5]. Komponen geokimia yang digunakan adalah kimia air dan gas, sementara untuk isotop adalah isotop alam ^{18}O dan ^2H dari molekul air dan ^{222}Rn dalam air.

Isotop ^{222}Rn merupakan produk peluruhan ^{226}Ra dalam deret peluruhan ^{238}U yang terjadi secara alami. Sebagai pemancar partikel α , ^{222}Rn dapat menimbulkan bahaya bagi kesehatan sehingga keberadaannya sering dipantau. Di sisi lain, ^{222}Rn juga dapat dimanfaatkan sebagai indikasi adanya suatu patahan dalam suatu sistem panasbumi [6], maupun untuk mempelajari dinamika airtanah dan air permukaan [7].

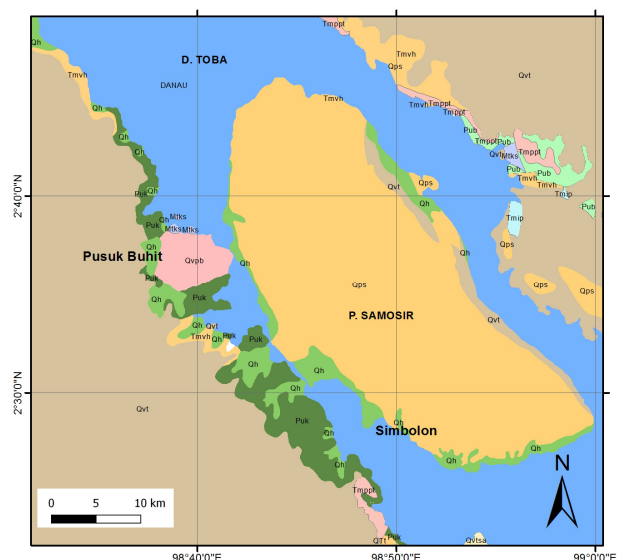
Dalam studi ini, dilakukan pengambilan sampel fluida panas bumi dari beberapa mata air panas di kedua lokasi panasbumi danau Toba yaitu Pusuk Buhit dan Simbolon (Gambar 1) untuk mengetahui karakteristik reservoir panasbumi seperti temperatur bawah permukaan, tipe dan evolusi fluida melalui komposisi kimia, gas dan isotop alam.



Gambar 1. Lokasi penelitian (Pusuk Buhit dan Simbolon)

Geologi Danau Toba

Danau Toba merupakan danau vulkanik bagian dari kompleks kaldera Toba yang terbentuk dan berevolusi sejak 1,3 juta tahun yang lalu [3]. Berdasarkan formasi batuan yang terbentuk, kaldera Toba tersusun di atas formasi Tufa Toba Tua yang tersingkap di selatan Toba (Gambar 2). Sementara di utara Toba terdapat singkapan Tufa Toba Tengah dengan litologi tufa riolit. Tufa Toba Muda merupakan produk erupsi vulkanik Toba termuda dengan komposisi litologi riolit dan riodasit. Pulau Samosir di tengah Danau Toba merupakan pulau baru yang terbentuk setelah erupsi gunung Toba purba [8].



Gambar 2. Geologi danau Toba [9].

BAHAN DAN METODE

Pengambilan sampel

Pengambilan sampel dilakukan terhadap beberapa manifestasi panasbumi seperti mata air panas dan fumarol. Pengambilan sampel gas dilakukan dengan menggunakan botol khusus yang berisi larutan NaOH 6 N dalam keadaan vakum. Fluida yang mengandung uap air (*condensable gas, CG*) dan *non condensable gas* (NCG) yang reaktif yaitu CO_2 dan H_2S akan larut dalam NaOH, sedangkan NCG yang tidak reaktif yaitu H_2 , He, Ar, N_2 , O_2 dan CH_4 menempati ruang vakum di atas larutan NaOH. Pengambilan sampel dilakukan dengan cara menangkap gas menggunakan corong atau pipa *stainless* yang

telah terhubung dengan botol sampel melalui selang silikon dengan meminimalisir kontaminasi dari udara luar [10], [11].

Pengambilan sampel mata air

Pengambilan sampel pada mata air panas dilakukan dengan pencidukan biasatepat pada lubang keluaran sumber mata air. Untuk sampel isotop ^{18}O dan ^2H , digunakan botol sampel 20 ml yang harus terisi penuh sampel tanpa ada gelembung udara untuk meminimalisir fraksinasi isotop. Untuk sampel kation dilakukan penambahan asam hingga pH 2 – 3, untuk mencegah pengendapan oksida logam kecuali jika pH sampel sudah berkisar 2, sedangkan untuk sampel anion tidak diperlukan perlakuan khusus [12]. Sampel air untuk analisis ^{222}Rn ditampung dalam botol khusus dan langsung dicacah mengingat waktu paro ^{222}Rn hanya 3,8 hari.

Analisis sampel

Analisis sampel gas dan cair dilakukan di laboratorium isotop dan kimia, Pusat Aplikasi

anion. Sedangkan untuk analisis kation (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} dan Li^+) juga ion kromatografi dengan kolom penukar kation.

Analisis isotop ^{18}O dilakukan dengan metode spektroskopi laser menggunakan alat *Liquid-Water Isotope Analyser* menggunakan 3 buah standar kerja. Sementara analisis ^{222}Rn dalam air dilakukan *in situ* menggunakan peralatan portabel Durrige RAD7.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis

Temperatur mata air panas di daerah Simbolon berkisar antara 37,9 °C hingga 89,9 °C dengan pH asam yaitu antara 0,97 hingga 1,72. Sementara di daerah Pusuk Buhit temperatur berkisar antara 52 °C hingga 56,8 °C dengan pH 1,06 sampai 1,98 (Tabel 1). Keseluruhan hasil analisis isotop, gas dan kimia dapat dilihat dalam Tabel 2. Semua mata air panas tidak mengandung HCO_3^- mengingat nilai pH di bawah 4,5.

Tabel 1. Parameter fisik mata air panas di Simbolon dan Pusuk Buhit

Kode	Lokasi	Elevasi (m)	Koordinat	T (°C)	pH	Cond. (mS)
SB01	Simbolon	923	98.73433 E 2.50712 S	89,9	0,97	4,74
SB02	Simbolon	930	98.73154 E 2.50789 S	37,9	1,72	1,04
PB01	Pusuk Buhit	942	98.67295 E 2.51929 S	56,8	1,06	4,38
PB02	Pusuk Buhit	949	98.67295 E 2.51929 S	52,0	1,98	2,87

Isotop dan Radiasi, BATAN – Pasar Jumat, Jakarta. Analisis gas dilakukan dengan dua metode, yaitu metode titrasi untuk gas reaktif (CO_2 dan H_2S) dan metode kromatografi gas untuk gas non reaktif (H_2 , He, Ar, N_2 dan CH_4) menggunakan GC Agilent 7890A dengan kolom porapak. Analisis kimia yang meliputi kation dan anion dilakukan dengan menggunakan beberapa metode. Metode titrasi digunakan untuk analisis HCO_3^- , dengan HCl sebagai titran. Ion kromatografi Metrohm 883 digunakan untuk analisis Cl^- , SO_4^{2-} , F^- dengan kolom resin penukar

Hasil analisis isotop alam menunjukkan perbedaan komposisi isotop antara daerah Simbolon dan Pusuk Buhit. Sampel air di daerah Simbolon memiliki komposisi $\delta^{18}\text{O}$ sekitar -10‰ dan sedangkan $\delta^2\text{H}$ -62‰. Sementara untuk daerah Pusuk Buhit komposisi isotop mata air panas memiliki nilai berkisar -8‰ dan -62‰ untuk $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Analisis ^{222}Rn terlarut dalam air menunjukkan nilai kandungan radioaktifitas yang tidak terlalu besar yaitu sekitar 184 hingga 369 Bq/m^3 .

Tabel 2. Hasil analisis kimia air, isotop airdan ^{222}Rn

Kode	Lokasi	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	K^+ (mg/l)	Na^+ (mg/l)	Li^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	B (mg/l)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	^{222}Rn (Bq/m ³)
SB01	Pitu Batu	105,8	63,5	22,9	7,6	0,01	59,2	212,0	50,6	ttd	-10,19	-61,3	369
SB02	Simbolon	3,6	6,0	16,1	9,1	0,01	7,2	97,7	59,5	ttd	-10,68	-62,8	184
PB01	Pusuk Buhit	66,8	55,1	27,8	17,2	0,01	46,6	509,0	55,3	0,2	-7,83	-62,7	-
PB02	Pusuk Buhit	25,5	32,2	6,9	85,9	0,01	6,8	456,9	51,8	ttd	-8,06	-61,7	221

Tabel 3. Hasil analisis sampel gas Pusuk Buhit dan Simbolon

Kode	Lokasi	CO_2	H_2S	He	H_2	N_2	O_2	Ar	CH_4	HCl	HF	NCG (% mol)
		(mmol/kg uap)										
PB-01	Pusuk Buhit	5956,17	48,61	0,0064	51,95	23,66	0,37	0,14	15,09	1,84	0,34	9,9
PB-02	Pusuk Buhit	6750,09	72,93	0,0258	49,87	23,89	0,15	0,16	12,02	2,75	0,37	11,1
SB-01	Simbolon	15867,57	49,5	0,0179	16,34	23,31	0,71	0,13	34,33	3,80	0,08	22,4
SB-02	Simbolon	15359,82	97,07	0,01	14,16	20,4	0,3	0,1	28,51	2,59	0,27	21,8

Sampel gas memperlihatkan bahwa kedua daerah memiliki kandungan NCG yang berbeda yaitu sekitar 10% di Pusuk Buhit dan 21% di Simbolon. Perbedaan kandungan NCG ini mencerminkan tingkat kondensasi uap di bawah permukaan yang juga berbeda, yaitu kondensasi uap lebih dominan terjadi di Pusuk Buhit dibandingkan dengan di daerah Simbolon. Komposisi gas yang paling dominan adalah gas CO_2 , yaitu mencapai 97% mol hingga 99% mol dari total NCG.

Kimia air

Berdasarkan plot $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl}$, terlihat bahwa fluida air panas di Pusuk Buhit dan Simbolon sama-sama terletak pada sudut sulfat, yaitu merupakan *steam heated waters*, bukan *mature waters* (Gambar 3) dimana fluida tipe ini terbentuk akibat pemanasan air tanah oleh uap panasbumi sehingga muncul kembali ke permukaan. Keasaman fluida terjadi karena H_2S yang terlarut dalam uap reservoir teroksidasi di dekat permukaan sehingga membentuk asam sulfat. Keasaman tersebut mengakibatkan pelarutan kation dari batuan sehingga fluida ini

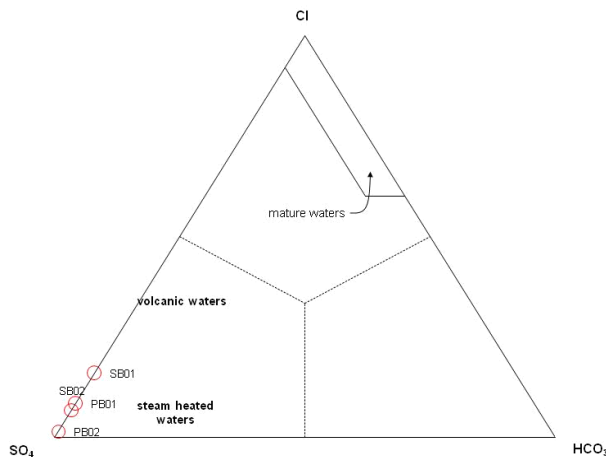
tidak dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer kimia seperti Na-K-Mg [13].

Proses terbentuknya mata air panas tersebut juga dapat terlihat dari diagram komposisi Li, B dan Cl di bawah ini (Gambar 4) dimana semua plot sampel berada di sudut klorida. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi kimia fluida Simbolon dan Pusuk Buhit bukan hanya terjadi akibat pelarutan batuan saja tetapi juga adanya penyerapan uap panasbumi dengan rasio B/Cl yang rendah ke dalam sistem air tanah dangkal.

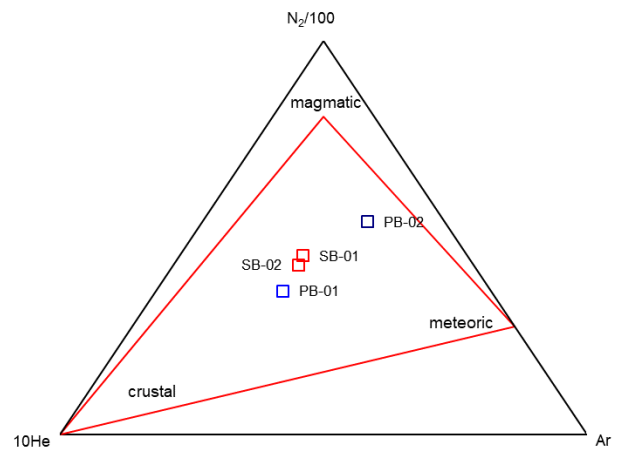
Geokimia gas

Komposisi gas panasbumi di Simbolon dan Pusuk Buhit menunjukkan dominasi CO_2 sebagai *non-condensable* gas dan beberapa spesi gas lain yang terdeteksi seperti N_2 dan CH_4 menunjukkan adanya fluida temperatur tinggi di bawah permukaan (Tabel 3).

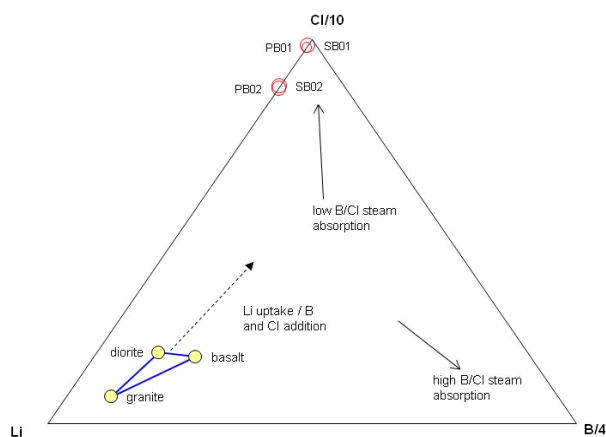
Adanya kandungan HF dan HCl dalam gas fumarol menunjukkan adanya kontribusi magmatik dalam sistem panasbumi tersebut. Hal ini diperjelas melalui diagram He- N_2 -Ar (Gambar 5) yang menunjukkan bahwa fluida Simbolon dan Pusuk Buhit merupakan fluida meteorik yang dipengaruhi kontribusi fluida magmatik [14].



Gambar 3. Diagram trilinear $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl}$ fluida panasbumi Simbolon dan Pusuk Buhit. Semua fluida menunjukkan komposisi *steam-heated waters*, bukan *mature waters*.



Gambar 5. Diagram trilinear He-Ar- N_2 . Fluida panasbumi Pusuk Buhit dan Simbolon didominasi komponen meteorik dengan pencampuran komponen magmatik.

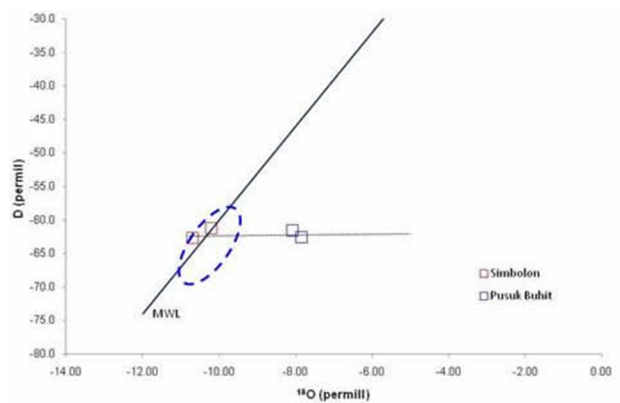


Gambar 4. Diagram trilinear Li-Cl-B. Fluida panasbumi Simbolon dan Pusuk Buhit terletak pada sudut Cl, menandakan absorpsi uap panasbumi dengan rasio B/Cl yang rendah ke dalam air tanah.

Estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan perhitungan beberapa persamaan geotermometer gas seperti terlihat dalam Tabel 4. Dalam tabel tersebut terlihat bahwa sebagian geotermometer menghasilkan perkiraan temperatur yang terlalu tinggi dan tidak realistis seperti geotermometer CO_2 , H_2/Ar dan CH_4/CO_2 sementara perhitungan geotermometer lain menghasilkan temperatur yang rasional [18,19]. Rata-rata estimasi temperatur reservoir hasil perhitungan untuk daerah Pusuk Buhit adalah 265°C sementara untuk Simbolon lebih rendah yaitu 235°C .

Isotop ^{18}O , ^2H dan ^{222}Rn

Berdasarkan data hasil analisis isotop, terlihat bahwa mata air panas Simbolon memiliki komposisi yang serupa dengan tipikal komposisi isotop mata air dingin dan air permukaan di daerah Toba dan sekitarnya, menandakan bahwa asal fluida Simbolon merupakan meteorik. Demikian juga dengan mata air panas di Pusuk Buhit. Meskipun terlihat mengalami pergeseran komposisi ^{18}O akibat interaksi air-batuan pada temperatur tinggi, asal fluida tersebut juga merupakan komponen meteorik (Gambar 6).



Gambar 6. Grafik hubungan $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menunjukkan bahwa fluida panasbumi Pusuk Buhit mengalami pergeseran oksigen, tetapi memiliki asal yang sama dengan fluida Simbolon yaitu meteorik.

Tabel 4. Estimasi temperatur reservoir berdasarkan perhitungan geotermometer gas [15,16,17].

Estimasi Temperatur (°C)							
Kode	DAP*	H ₂ S	CO ₂	H ₂ /Ar	CO ₂ /H ₂	H ₂ S/H ₂	CH ₄ /CO ₂
PB-01	228	283	389	356	242	305	320
PB-02	230	294	394	350	238	298	331
SB-01	168	283	436	323	193	286	325
SB-02	174	302	434	325	190	272	330

*DAP = D'Amore Panichi

Pencacahan ²²²Rn menunjukkan konsentrasi yang tidak terlalu tinggi baik di Pusuk Buhit maupun Simbolon yaitu berkisar 180-370 Bq/m³, jauh lebih rendah dibandingkan tipikal fluida di daerah panasbumi dan vulkanik yang dapat mencapai orde ribuan hingga puluhan ribu Bq/m³ [20,21]. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya pengenceran oleh airtanah dangkal yang sedikit atau tidak mengandung ²²²Rn, sebagaimana juga diindikasikan dari komposisi kimia mata air panas.

KESIMPULAN

Berdasarkan data isotop stabil δ¹⁸O dan δ²H, gas dan kimia, fluida panasbumi Toba berasal dari fluida meteorik yang sama dengan sedikit bercampur dengan fluida magmatik. Namun demikian, fluida panasbumi yang muncul di Pusuk Buhit telah mengalami interaksi air-batuan yang lebih intens dibandingkan fluida di Simbolon.

Fluida panasbumi Toba, baik di Pusuk Buhit maupun Simbolon telah mengalami pencampuran dengan airtanah sehingga tidak dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer kimia. Hasil pencacahan ²²²Rn yang rendah juga menunjukkan adanya pencampuran fluida panasbumi dengan air tanah/air permukaan.

Estimasi temperatur reservoir berdasarkan perhitungan geotermometer gas berkisar antara 265°C dan 235°C. Dengan demikian reservoir Toba termasuk reservoir entalpi tinggi dan layak untuk dikembangkan lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini dibiayai oleh anggaran DIPA PAIR BATAN tahun 2015. Penulis mengucapkan

terimakasih kepada Paston Sidauruk, Ph.D. yang telah memfasilitasi perjalanan sampling serta rekan kelompok Hidrologi yang telah membantu pelaksanaan studi di lapangan maupun di lab.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fauzi, A., Geothermal resources and reserves in Indonesia: an updated revision, *Geoth. Energy. Sci.*, 3, 1-6, 2015, <http://www.geoth-energ-sci.net/3/1/2015/>
2. Darma, S., Tisnaldi, Gunawan, R., Country update: Geothermal energy use and development in Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne*, 2015.
3. Chesner, C.A., The Toba caldera complex, *Quaternary International*, vol. 258, pp. 5-18, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.025>
4. Ármannsson, H., The fluid geochemistry of Icelandic high temperature geothermal areas, *Applied Geochemistry*, vol. 66, March 2016, pp. 14-64, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.008>
5. Maria Battistel, Shaul Hurwitz, William C. Evans, Maurizio Barbieri, The chemistry and isotopic composition of waters in the low-enthalpy geothermal system of Cimino-Vico Volcanic District, Italy, *J. of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 328, 15 December 2016, pp. 222-229, 2016,

- <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.11.005>
6. de La Cruz, Isabelle, D.B., Mena, M., Monnin, M., Romero, M., Segovia, N., Seidel, J.L., Pialoux, P., Armienta, M.A., Radon emanation related to geothermal field, *Nuclear Tracks*, vol. 12, pp. 875-878, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum.*, Part D, 1986, [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(86\)90724-7](https://doi.org/10.1016/1359-0189(86)90724-7)
 7. Dimova, N.T., Burnett, W.C., Chanton, J.P., Corbett, J.E., Application of radon-222 to investigate groundwater discharge into small shallow lakes, *J. of Hydrology*, 486 (2013) 112-122, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.043>
 8. Kusumasari, B.A., Yonezu, K., Herdianita, N.R., Taguchi, S., Watanabe, K., Fluid geochemistry characteristics of Simbolon and Pusuk Bukit geothermal area in Toba caldera, North Sumatera province, Indonesia, 35th New Zealand Geothermal Workshop, Proceedings, Rotorua, New Zealand, 2013.
 9. Aldiss, D.T., Whandoyo, R., Ghazali, S.A., Kusyono, Peta Geologi Lembar Sidikalang dan (Sebagian) Sinabang, Sumatera Utara, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1983.
 10. Arnorsson, S., Bjarnasson, J.O., Giroud, N., Gunnarsson, I., Stefansson, A., Sampling and analysis of geothermal fluids, *Geofluids*, vol. 6, pp. 203 – 216, 2006, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-8123.2006.00147.x>
 11. Giggenbach, W.F., and Goguel, R.L., Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharge, Chemistry Division, Departement of Sciences and Industrial Research, New Zealand, 1989.
 12. Clark, I., Fritz, P., Environmental isotopes in hydrogeology, Lewis Publisher, New York, 1997.
 13. Giggenbach, W.F., Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers, *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 52, pp. 2749–2765, 1988, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
 14. Giggenbach W.F., The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3d Edition (H. L. Barnes, Ed.), Wiley, 737-796, 1997.
 15. D'Amore, F., Panichi, C., Evaluation of deep temperatures in hydrothermal systems by a new gas geothermometer, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 549-556, 1980, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90051-4](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(80)90051-4)
 16. Arnorsson, S., Fridriksson, Th., Gunnarsson, I., Gas chemistry of the Krafla geothermal field, Iceland, *Water-Rock Interaction Proc. Int. Symp. Auckland, New Zealand*, 1998.
 17. Giggenbach, W.F., Chemical techniques in geothermal exploration – Application of geochemistry in geothermal reservoir development, UNITAR/UNDP Center on Small Energy Resources, Rome-Italy, 119-144, 1991.
 18. Armansson, H., The fluid geochemistry of Icelandic high temperature geothermal area, *Applied Geochemistry* 66, 14-64, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.008>
 19. Guo, Q., Pang, Z., Wang, Y., Tian, J., Fluid geochemistry and geothermometry applications of the Kangding high-temperature geothermal system in eastern Himalayas, *Applied Geochemistry* 81, 63-75, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.007>
 20. Mismanos, J.W., Vasquez, A.A., Scouting for permeable structures in geothermal systems using soil gas radon, *Proceedings*

- World Geothermal Congress 2015,
Melbourne, Australia, 2015.
21. Zimmer, M., Erzinger, J., Continuous H₂O,
CO₂, ²²²Rn and temperature measurements
on Merapi volcano, Indonesia, *J. of
Volcanology and Geothermal Research*,
124 (2003), pp. 25-38, 2003,
[https://doi.org/10.1016/S0377-
0273\(03\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00087-8)